# Cahier technique n° 101

## Les disjoncteurs à autosoufflage de $SF_6$ sous contraintes sévères

J.C. Henry
G. Perrissin
C. Rollier

Merlin Gerin
Modicon
Square D
Telemecanique

Schneider Electric

Les Cahiers Techniques constituent une collection d'une centaine de titres édités à l'intention des ingénieurs et techniciens qui recherchent une information plus approfondie, complémentaire à celle des guides, catalogues et notices techniques.

Les Cahiers Techniques apportent des connaissances sur les nouvelles techniques et technologies électrotechniques et électroniques. Ils permettent également de mieux comprendre les phénomènes rencontrés dans les installations, les systèmes et les équipements.
Chaque Cahier Technique traite en profondeur un thème précis dans les domaines des réseaux électriques, protections, contrôle-commande et des automatismes industriels.

Les derniers ouvrages parus peuvent être téléchargés sur Internet à partir du site Schneider Electric.
Code : **http://www.schneider-electric.com**
Rubrique : **Le rendez-vous des experts**

Pour obtenir un Cahier Technique ou la liste des titres disponibles contactez votre agent Schneider Electric.

La collection des Cahiers Techniques s'insère dans la « Collection Technique » de Schneider Electric.

**Avertissement**

L'auteur dégage toute responsabilité consécutive à l'utilisation incorrecte des informations et schémas reproduits dans le présent ouvrage, et ne saurait être tenu responsable ni d'éventuelles erreurs ou omissions, ni de conséquences liées à la mise en œuvre des informations et schémas contenus dans cet ouvrage.

La reproduction de tout ou partie d'un Cahier Technique est autorisée après accord de la Direction Scientifique et Technique, avec la mention obligatoire : « Extrait du Cahier Technique Schneider Electric n° (à préciser) ».

# n° 101

# Les disjoncteurs à autosoufflage de $SF_6$ sous contraintes sévères

**J.C. HENRY**

**Ingénieur IEG.**
**Chef du Service Technique branche Transport Haute Tension.**

**G. PERRISSIN**

**Ingénieur PST.**
**Station d'Essais à Grande Puissance.**

**C. ROLLIER**

**Ingénieur ESE.**
**Service Technique Très Haute Tension.**

**CT101** édition octobre 1978

# Les disjoncteurs à autosoufflage de $SF_6$ sous contraintes sévères

Le développement des réseaux de transport et des réseaux industriels place les disjoncteurs haute tension dans des conditions de fonctionnement beaucoup plus sévères que celles prévues par les normes.

C'est le cas :

- des lignes très longues (mises sous tension ou hors tension, coupure des réactances shunt) ;
- des transformateurs à forte puissance lorsqu'un défaut apparaît immédiatement en aval de l'appareil.

Le disjoncteur à autosoufflage de $SF_6$ a un comportement satisfaisant et le recours à l'utilisation de résistances auxiliaires n'est envisagé que pour la mise sous tension des longues lignes haute tension.

## Sommaire


| | | |
|---|---|---|
| **1 Introduction** | | **p. 4** |
| **2 Cas des lignes longues à très haute tension** | 2.1 L'enclenchement de lignes ouvertes à leur extrémité | **p. 5** |
| | 2.2 Le déclenchement de lignes ouvertes à leur extrémité | p. 6 |
| | 2.3 Le déclenchement de réactances shunt | p. 8 |
| **3 Cas du défaut alimenté à travers un transformateur** | 3.1 Contraintes | **p. 12** |
| | 3.2 Résultats d'essais | p. 12 |
| | 3.3 Conclusions | p. 13 |
| **Annexe : Les surtensions lors de la coupure des faibles courants inductifs** | Arrachement du courant | **p. 14** |
| | Réallumages successifs | p. 15 |
| **Bibliographie** | | **p. 16** |

# 1 Introduction

La connaissance du fonctionnement des réseaux de transport à haute tension et des phénomènes qui s'y déroulent lors de la manœuvre des disjoncteurs qui les protègent, a progressé de manière tres sensible au cours des vingt dernières années. L'examen théorique des conditions de fonctionnement, l'analyse des incidents et les travaux de la CIGRE (Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques), ont abouti à un recensement de toutes les conditions qui doivent être prises en compte pour la conception et la vérification des matériels de coupure destinés aux réseaux haute tension. En finale, ce processus s'est concrétisé par la reconnaissance de ces conditions de coupure dans le cadre des Normes Internationales dont le volume et la complexité traduisent l'étendue du travail accompli, certains points faisant encore l'objet de travaux importants.

Cependant, de temps à autre, des situations particulières ne relevant pas directement des conditions de fonctionnement prévues par les normes peuvent apparaître. Par exemple, l'exploitation intense des ressources hydroélectriques de certains pays, entraînant l'installation de lignes très longues justifie que les concepteurs de ces réseaux définissent des conditions non normalisées pour la vérification des disjoncteurs. Ces problèmes seront développés dans la première partie de ce rapport.

Des situations exceptionnelles concernent également certaines installations comportant des transformateurs de très forte puissance à faible tension de court-circuit. Ces installations d'un type particulier, engendrent pour les disjoncteurs des contraintes sévères qui n'ont pas été prises en compte dans les normes, parce que s'éloignant trop des conditions de sévérité généralement rencontrées par les disjoncteurs de réseaux. Ce deuxième problème fera l'objet de la deuxième partie du rapport.

Dans chaque cas, on exposera les contraintes subies par le disjoncteur, et les méthodes d'essais utilisées pour s'assurer du bon comportement d'un disjoncteur à autosoufflage de $SF_6$.

# 2 Cas des lignes longues à très haute tension

La technique de l'autosoufflage de gaz $SF_6$, appliquée depuis longtemps aux appareils des réseaux de distribution à moyenne tension s'est étendue progressivement, du fait de ses avantages, aux appareils des réseaux haute tension [1].

La très bonne expérience d'exploitation obtenue jusque-là a conduit les exploitants de réseaux à chercher à étendre les nombreux avantages de ces appareils aux réseaux de tension plus élevée, en particulier aux réseaux 525 kV qui constituent l'ossature des réseaux de transport de très nombreux pays du continent américain où l'importance des puissances à transporter et l'éloignement des centres de consommation ont favorisé le choix de ce niveau de tension élevé. Il faut rappeler que le choix d'un niveau de tension élevé n'est réellement avantageux que si l'on a prévu la limitation des surtensions temporaires et des surtensions de manœuvre qui peuvent se manifester sur un réseau haute tension. Sans cela, le coût supplémentaire de l'isolation à prévoir pour le réseau qui devrait supporter de fortes surtensions, réduit à zéro l'économie réalisée par la réduction des pertes.

Le développement des réseaux de tension supérieure ou égale à 525 kV a donc nécessité en particulier la prise en compte de trois conditions de manœuvres qui sont de nature à engendrer les surtensions les plus fortes :

- l'enclenchement et le réenclenchement de lignes ouvertes à leur extrémité ;
- la coupure de lignes à vide sous tension exceptionnellement élevée ;
- la coupure de réactances shunt.

## 2.1 L'enclenchement de lignes ouvertes à leur extrémité

Un disjoncteur protégeant une ligne peut être appelé à mettre sous tension cette ligne ouverte à son extrémité.

Les surtensions dues à la réflexion se produisant à l'extrémité ouverte doivent absolument être maîtrisées. Les niveaux de surtension à respecter ne font pas l'objet de normes internationales pour l'instant et leur spécification reste du ressort du concepteur de réseau. Parmi toutes les méthodes qui ont été proposées pour la limitation des surtensions d'enclenchement, la plus simple consiste à mettre sous tension la ligne par l'intermédiaire d'une résistance choisie en fonction des caractéristiques et de la longueur de la ligne.

Les disjoncteurs aptes à protéger les réseaux 525 kV et 765 kV doivent donc être munis de chambres auxiliaires permettant l'insertion des résistances pendant un temps déterminé. Cette sujétion, bien acceptée par les disjoncteurs à air comprimé, l'est également par les disjoncteurs à autosoufflage de $SF_6$. Il a été possible en effet, d'adjoindre au mécanisme très simple de ces appareils, une liaison mécanique entraînant les contacts d'insertion des résistances lors d'une manœuvre de fermeture (cf. **fig. 1** ).

Ces contacts reviennent automatiquement en position d'ouverture immédiatement après l'enclenchement des contacts principaux. Une telle liaison mécanique assure une excellente précision des temps d'insertion des résistances dans le circuit au moment de la fermeture.

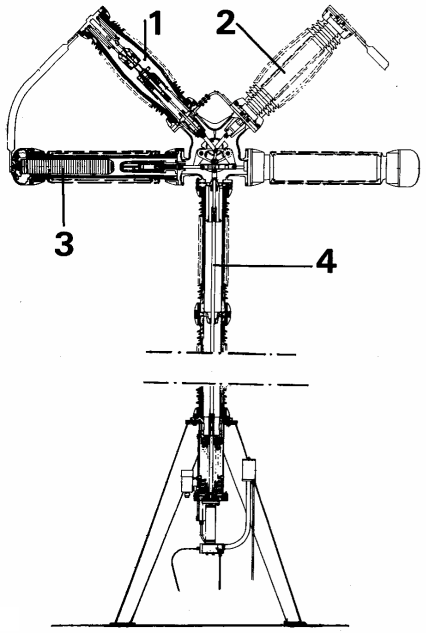


*Fig. 1 : coupe d'un élément de pôle de disjoncteur 525 kV, équipé de résistances de fermeture.*
*1. Intervalle de coupure*
*2. Condensateur de répartition*
*3. Résistance de fermeture*
*4. Isolement support*

Le choix de la valeur de la résistance peut être effectué à partir de mesures sur modèles de réseaux ou par le calcul. En particulier, des mesures effectuées sur analyseur transitoire ont permis de déterminer les valeurs maximales des résistances et les temps d'insertion minimaux à prévoir pour la limitation des surtensions de réenclenchement sur une ligne 525 kV de 400 km de longueur, à une valeur de 2,2 p.u. lorsque la ligne n'est pas compensée, et à une valeur de 2 p.u. lorsqu'elle est compensée (cf. **fig. 2** ).

Les disjoncteurs à autosoufflage de $SF_6$ équipés d'un jeu de chambres auxiliaires (cf. **fig. 3** ) comportant des résistances, sont donc en mesure de répondre à l'exigence de limitation des surtensions de réenclenchement, exigence majeure pour le dimensionnement de l'isolation des réseaux très haute tension.

| | **Ligne non compensée** | **Ligne compensée** | |
|---|---|---|---|
| | | **à 40 %** | **à 70 %** |
| Valeur de la résistance (Ohms) | 360 | 360 | 1 000 |
| Temps d'insertion (ms) | 10 | 8,4 | 10 |
| Niveau de surtension (probabilité cumulée à 98 %) p.u. | 2,2 | 2 | 2 |

***Fig. 2***

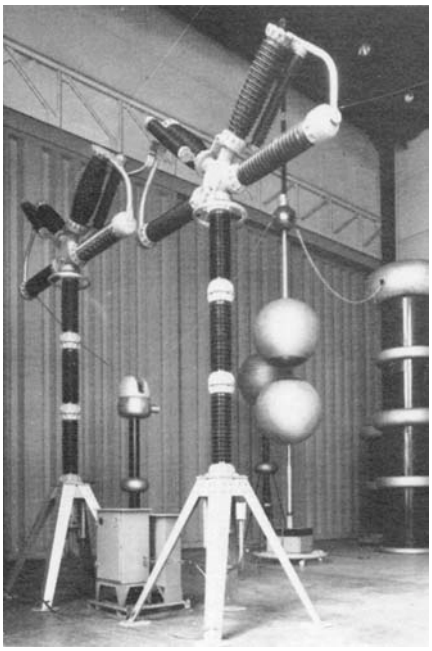

***Fig. 3*** *: pôle d'un disjoncteur à autosoufflage de $SF_6$ à 4 intervalles de coupure, équipé de résistances de fermeture.*
*$U_n$ = 525 kV ; $I_c$ = 50 kA ; $I_n$ = 3 150 A*

## 2.2 Le déclenchement de lignes ouvertes à leur extrémité

**Contraintes**

La sévérité des conditions imposées à un disjoncteur lors de l'ouverture d'une ligne ouverte à son extrémité peut être telle que ce soient ces conditions de coupure qui imposent le dimensionnement du disjoncteur, et en particulier, le choix du nombre d'intervalles de coupure. Le fait principal est que, un demi cycle après la coupure, le disjoncteur doit accepter entre ses bornes une tension au moins égale au double de la valeur de crête de la tension phase-terre du réseau avant la coupure. Malheureusement, au moment du déclenchement, il peut se faire que la tension entre phase et terre du pôle qui doit déclencher ait atteint des valeurs très supérieures aux valeurs spécifiées dans les normes pour l'essai du disjoncteur dans un tel cas de coupure.

Cette surélévation dynamique de tension peut elle-même être le résultat de plusieurs causes. En particulier, l'ouverture du disjoncteur situé à l'extrémité réceptrice d'une ligne transitant une forte charge va laisser cette ligne ouverte à son extrémité.

La tension de celle-ci augmente du fait de la suppression brusque de la charge qui n'est pas immédiatement compensée par la régulation de tension et du fait de la charge capacitive que constitue la ligne. Par conséquent, le disjoncteur situé à l'extrémité émettrice peut être appelé à déclencher la ligne alors que la tension phase-terre à l'extrémité émettrice a largement dépassé la valeur normale.

Les conditions particulières de certains réseaux ont fait apparaître la possibilité de surtensions dynamiques élevées, de l'ordre de 1,5 p.u.,

malgré l'effet favorable que produisent les réactances de compensation sur la limitation des surtensions dynamiques. Par exemple, la tension entre phases d'un réseau 525 kV peut s'élever temporairement jusqu'à 750 kV et celle d'un réseau 765 kV, jusqu'à 1 100 kV.
Ces conditions sont exceptionnelles et il est bien normal que de telles situations soient exclues des conditions de vérification précisées par les normes pour les coupures de lignes à vide. Néanmoins, le fait que de tels cas concrets se posent a nécessité la vérification de l'aptitude des disjoncteurs à supporter de telles tensions. Même si l'on peut admettre que de telles vérifications soient faites sur le lieu même d'exploitation du réseau, il est absolument nécessaire que le constructeur démontre a priori, l'aptitude de son matériel.

### Méthodes d'essais

Pour des tensions de réseau ne dépassant pas 245 kV, il est généralement possible de faire l'essai direct en station d'essais et en utilisant une ligne réelle. Dès que la tension du réseau atteint 420 kV, l'essai direct devient plus difficile par suite des conditions d'exploitation rendant souvent impossible la disponibilité d'une ligne à vide de longueur suffisante.

Un autre processus d'essai consiste à simuler la ligne à vide au moyen d'une batterie de condensateurs. Là encore, les limites des laboratoires sont assez rapidement atteintes si l'on tient compte du dimensionnement de la batterie nécessaire à l'obtention des courants importants simulant des lignes de grandes longueurs avec les fortes tensions envisagées précédemment. Le constructeur est donc amené à faire des essais non plus sur un pôle complet, mais seulement sur une fraction de pôle, voir même sur un seul intervalle de coupure. Ces essais peuvent s'effectuer soit sur un circuit direct comprenant des batteries de condensateurs de forte capacité, soit à l'aide d'un circuit synthétique. C'est cette dernière méthode que nous avons utilisée ; le schéma est celui de la **figure 4**. L'avantage d'un tel circuit est de ne mettre en œuvre que des batteries de condensateurs de faibles dimensions. En effet, sur le circuit « courant » où une forte valeur de capacité est nécessaire, il suffit d'une tension relativement basse, et sur le circuit « tension », une capacité de faible valeur isolée pour la pleine tension convient.

Les essais par éléments séparés pour la coupure de courants de lignes à vide ne sont pas explicitement prévus dans les normes et leur utilisation demande certaines précautions. Pour les disjoncteurs à durée d'arc minimale faible

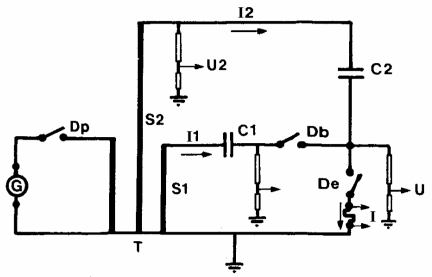


*Fig. 4 : schéma du circuit synthétique pour coupure de courant de lignes à vide.*
*- Dp : disjoncteur de protection*
*- Db : disjoncteur de blocage*
*- De : disjoncteur en essais*
*- T : transformateur à 2 enroulements secondaires*
*- G : générateur*
*- S1: circuit « courant »*
*- S2 : circuit « tension »*
*- C1: batterie de condensateur du circuit « courant »*
*- C2 : batterie de condensateur du circuit « tension »*
*- U : tension de rétablissement aux bornes de De*
*- I : courant coupé par De*
$I = I1 + I2$ ; $U = U2 - U_{C2}$

(c'est le cas des disjoncteurs à autosoufflage de $SF_6$ le défaut de synchronisme entre intervalles de coupure d'un même pôle, ne doit pas dépasser la valeur de 2 ms environ. Il faut en effet que la surcharge en tension sur le premier intervalle qui ouvre soit négligeable. Un calcul rapide montre que, dans le cas d'une durée d'arc minimale de 1 ms, un défaut de synchronisme de 2 ms entraîne une surcharge de tension de 7 % sur le premier intervalle qui ouvre dans le cas d'un disjoncteur à 4 chambres, et de 12 % pour un disjoncteur de 6 chambres. Par conséquent, cette méthode s'applique bien au disjoncteur essayé dont le synchronisme des chambres est bien assuré et qui ne comporte qu'un faible nombre d'intervalles de coupure.

### Résultats d'essais

Les essais ont été effectués sur un intervalle de coupure du disjoncteur à autosoufflage de $SF_6$, représenté à la figure 2. Les essais représentent la contrainte subie par un intervalle de coupure d'un disjoncteur qui en comporte 4, dans le cas où la tension entre phases du réseau 525 kV s'élèverait à 750 kV.

La **figure 5** représente un oscillogramme d'une telle coupure.
La tension d'essai est déterminée d'après la relation suivante :

$$U2 = 1{,}2 \times \frac{750}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{4} \text{ kV}$$

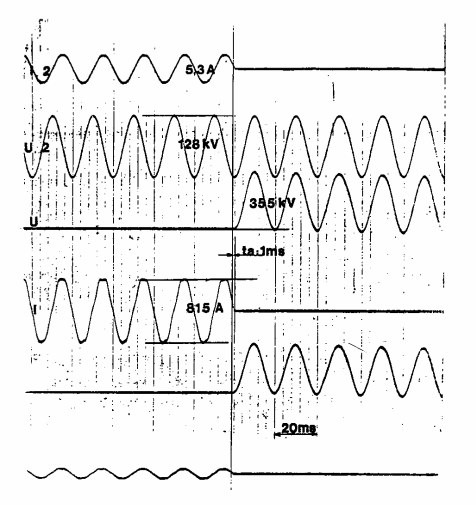


*Fig. 5 : oscillogramme relevé lors de la coupure du courant capacitif sur le circuit représenté à la figure 3.*

Les essais ont été effectués conformément à la norme en ce qui concerne l'instant de séparation des contacts. Les résultats en sont indiqués dans le tableau de la **figure 6**.

Ces résultats ne donnant lieu à aucun réamorcage, démontrent bien l'aptitude du disjoncteur à couper les lignes à vide dans les conditions sévères décrites précédemment.

| N° | U2 (kV) | U (kV crête) | I (A) | ta (ms) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 128 | 345 | 815 | 2 |
| 2 | 128 | 340 | 815 | 9 |
| 3 | 128 | 353 | 815 | 8 |
| 4 | 128 | 340 | 815 | 6 |
| 5 | 128 | 352 | 815 | 5 |
| 6 | 128 | 352 | 815 | 3 |
| 7 | 128 | 353 | 815 | 2 |
| 8 | 128 | 355 | 815 | 1 |
| 9 | 128 | 332 | 815 | 9 |
| 10 | 128 | 340 | 815 | 8 |
| 11 | 128 | 332 | 815 | 7 |
| 12 | 128 | 340 | 815 | 5 |

*Fig. 6 : résultats des essais de coupure de courant de lignes à vide.*

## 2.3 Le déclenchement de réactances shunt

L'utilisation de réactances de compensation branchées en parallèle sur les lignes est presque toujours nécessaire dans les réseaux à très haute tension. Elles permettent en effet d'éviter de trop fortes surélévations de tension le long de la ligne, dans le cas où celle-ci est à vide ou faiblement chargée. On connaît également l'effet très favorable qu'exercent les réactances de compensation sur les surtensions dynamiques en cas de rupture de charge à l'extrémité d'une longue ligne. Enfin, les réactances exercent aussi un effet favorable sur la limitation des surtensions de manœuvre d'enclenchement ou de réenclenchement de lignes à vide.

Plusieurs possibilités s'offrent alors pour bénéficier des avantages des réactances shunt :

- brancher en permanence, en parallèle sur chaque phase de la ligne, une inductance dont la valeur est choisie pour être acceptable dans tous les cas de fonctionnement du réseau ;
- ou bien connecter l'inductance à la ligne par l'intermédiaire d'un disjoncteur dont l'enclenchement ou le déclenchement commandé permet une plus grande souplesse dans l'utilisation de la réactance selon la charge transmise par la ligne (cf. **fig. 7** ).

Ces disjoncteurs fonctionnent dans des conditions particulières puisqu'ils ont à interrompre un courant faible (quelques centaines d'ampères) et qu'ils manœuvrent très fréquemment.

Ils doivent donc posséder une très grande fiabilité mécanique, et ne pas provoquer des

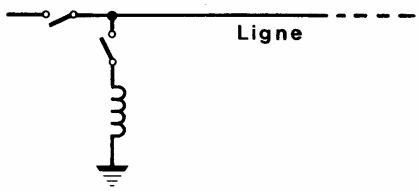


*Fig. 7 : schéma de branchement des réactances shunt.*

surtensions anormales lors de la coupure de ce courant.
L'excellente fiabilité des disjoncteurs à autosoufflage de $SF_6$ a déjà fait l'objet de publications [1], elle est principalement due à la simplicité de leur conception.

En revanche, le comportement des disjoncteurs lors de la coupure des faibles courants inductifs est assez mal connu et l'établissement des normes d'essais correspondantes s'avère difficile du fait du grand nombre de paramètres susceptibles d'intervenir et du caractère aléatoire des résultats généralement obtenus. D'autre part, il est rarement possible de représenter correctement en laboratoire, les conditions réelles de fonctionnement des disjoncteurs prévus pour des tensions très élevées.

On rencontre généralement deux difficultés :

- tension d'essai trop faible ;
- capacités propres du circuit d'essai trop élevées.

Il est donc très souhaitable de pouvoir prédéterminer les surtensions susceptibles de se produire dans n'importe quelles conditions de fonctionnement, en se basant sur les résultats d'essais effectués dans des conditions précises, si possible avec un nombre réduit d'intervalles de coupure en série. Des auteurs ont déjà mis en évidence certaines lois de variation du courant arraché, générateur de surtensions [2]. On verra que les résultats obtenus en station d'essais sur un disjoncteur à autosoufflage de $SF_6$ du type représenté à la figure 3 vérifient bien ces lois et qu'ainsi, une évaluation des surtensions maximales que peut engendrer un tel disjoncteur, est possible.

### Conditions d'essais

Deux séries d'essais différentes totalisant plus de 100 coupures ont été effectuées sur plusieurs éléments du disjoncteur. Dans les deux cas, les circuits d'essais sont monophasés ; leurs caractéristiques essentielles sont les suivantes (cf. **fig. 8** ) :

- Série N° 1

U = 235 kV
f = 50 Hz
I = 245 - 517 - 1 100 A
$C_1$ = 1 µF
$C_2$ = 46 - 127 nF
Nombre d'intervalles de coupure en série = 3

- Série N° 2

U = 20 - 40 kV
f = 50 Hz
I = 250 - 500 A
$C_1$ = 17nF
$C_2$ = 1,9 à12 nF
Nombre d'intervalles de coupure en série = 1 ou 2.

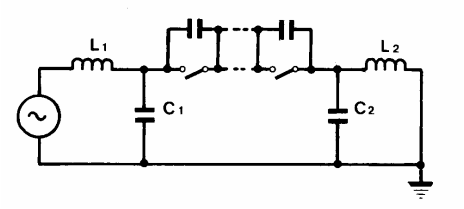


*Fig. 8 : schéma du circuit d'essais de coupure de courant inductif.*

La série N° 1, effectuée sur un disjoncteur à 3 chambres est représentative du fonctionnement d'un appareil à 4 chambres sur un réseau 525 kV. La tension du circuit d'essai de 235 kV était la plus haute valeur de tension disponible au laboratoire. Au cours de cette série, il n'a pas été possible de réduire la capacité du circuit aval à une valeur suffisamment faible pour être représentative de la capacité propre d'une réactance shunt. C'est pourquoi, des essais ont été effectués à tension réduite, avec des capacités aval de faible valeur, afin d'étudier l'influence du nombre d'intervalles de coupure et de la capacité sur la valeur du courant arraché.

### Résultats d'essais

Deux phénomènes sont susceptibles de se produire à l'occasion de la coupure des faibles courants inductifs : l'arrachement de courant et les réallumages successifs (voir annexe 1).
A l'occasion des deux séries d'essais, l'arrachement de courant a été observé de façon presque systématique, mais aucune coupure n'a donné lieu à des réallumages successifs. Ce résultat est très important car il signifie que les surtensions produites par le disjoncteur peuvent être prédéterminées de façon sûre si on peut connaître la loi de variation du courant arraché en fonction des paramètres du circuit. Des résultats qui ont été obtenus antérieurement par les auteurs à l'occasion d'essais de disjoncteur à autosoufflage de $SF_6$ aussi bien que certaines études théoriques et expérimentales publiées montrent que le courant arraché serait déterminé par la relation suivante :

$$I_0 = \lambda \sqrt{n\ C'_3} \qquad (6)$$

où $I_0$ est le courant arraché, $\lambda$ est un coefficient propre au disjoncteur exprimé en Ampères $(\text{Farad})^{-1/2}$, n est le nombre d'intervalles de coupure en série par pôle, $C'_3$ est la capacité en parallèle sur le pole.

Pour déterminer le coefficient $\lambda$, grâce aux résultats d'essais, seuls sont pris en compte les résultats obtenus pour des durées d'arc supérieures ou égales a 5 ms. Les durées d'arc plus courtes donnent lieu à des courants

arrachés qu'il n'est pas intéressant d'étudier du fait de leurs faibles valeurs et de leur dispersion ainsi que de l'imprécision de leur mesure.

Le tableau de la **figure 9** indique les valeurs moyennes de $\lambda$ obtenues sur les différents circuits d'essais, chaque moyenne étant généralement calculée sur 5 essais. On constate que les valeurs ainsi obtenues sont très voisines alors que les conditions d'essais couvrent une gamme très étendue des valeurs des paramètres n et $C'_3$ ; ceci démontre que la relation (6) s'applique bien à ce type de disjoncteur.

Le coefficient $\lambda$ étant indépendant du circuit d'essai, il est intéressant d'analyser sa distribution statistique pour l'ensemble des essais considérés. La **figure 10** représente l'histogramme des valeurs de $\lambda$ qui fait apparaître une distribution gaussienne :

la valeur moyenne $\bar{\lambda} = 88{,}5 \times 10^3 \ A \ F^{-1/2}$

l'écart type $\sigma = 14 \times 10^3 \ A \ F^{-1/2}$.

La courbe de fréquence cumulée de $\lambda$ est représentée sur la **figure 11** sur laquelle est tracée également la loi normale correspondant à $\lambda$ et $\sigma$. On constate que la distribution de $\lambda$ suit bien une loi normale en particulier pour les valeurs supérieures à la valeur moyenne. Ceci permet de calculer la probabilité d'existence des fortes valeurs de courant arraché.

**Calcul des surtensions**

Dans le cas général où la capacité amont est grande devant les autres capacités du circuit, le facteur de surtension est donné par la relation suivante, établie dans l'annexe 1 :

$$k = \sqrt{1 + \frac{n \lambda^2 L_2}{U_m^2}} \qquad (10)$$

où $L_2$ est la self aval et $U_m$ est l'amplitude de la tension phase-terre.

Le coefficient $\lambda$ étant connu de facon statistique, il est possible de calculer la probabilité d'apparition des surtensions dans le cas du disjoncteur à 4 intervalles de coupure, utilisé pour la manœuvre des réactances shunt sur un réseau 525 kV. A titre d'exemple, considérons 3 valeurs de réactances correspondant respectivement à des puissances monophasées de 37, 75 et 150 MVA. En appliquant à $\lambda$ la loi normale définie au paragraphe précédent, on obtient les résultats consignés dans le tableau de la **figure 12**.

Ces valeurs de surtension prédéterminées, bien que reposant sur un échantillonnage relativement restreint (environ 100 essais) montrent néanmoins que le disjoncteur essayé ne produira pas de surtension anormalement élevée en utilisation sur le réseau.

A titre de comparaison, des essais effectués sur un disjoncteur à air comprimé ont permis de

| Nombre de chambres | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tension (kV) | 20 | 20 | 20 | 20 | 40 | 20 | 20 | 20 | 40 | 235 | 235 | 235 |
| Courant coupé (A) | 250 | 250 | 250 | 250 | 500 | 250 | 250 | 250 | 500 | 245 | 517 | 1 100 |
| $C'_3$ (nF) | 4,2 | 5,2 | 9,2 | 9,5 | 9,2 | 3,9 | 7,9 | 8,3 | 7,9 | 110 | 45 | 47 |
| $\lambda \times 10^{-3}$ | 94 | 89 | 95 | 90 | 92 | 81 | 84 | 96 | 96 | 81 | 74 | 92 |

*Fig. 9 : valeur moyenne du coefficient $\lambda$ pour les durées d'arc inférieure à 5 ms.*

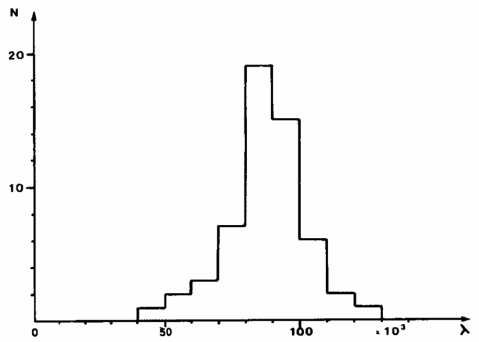


*Fig. 10 : histogramme des valeurs du coefficient $\lambda$.*

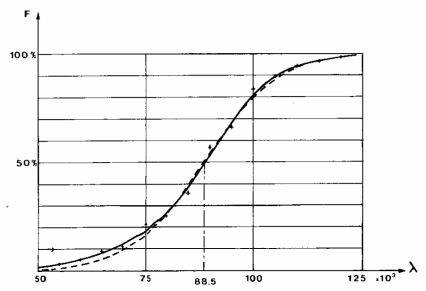


*Fig. 11 : fréquence cumulée des valeurs du coefficient $\lambda$.*
— *résultats expérimentaux*
--- *loi normale : $\lambda = 88{,}5 \times 10^3$; $\sigma = 14 \times 10^3$*

| k | | | |
|---|---|---|---|
| P | 150 MVA | 75 MVA | 37 MVA |
| $10^{-2}$ | 1,27 | 1,5 | 1,87 |
| $10^{-3}$ | 1,32 | 1,57 | 2 |
| $10^{-4}$ | 1,35 | 1,62 | 2,07 |

***Fig. 12** : probabilité calculée des niveaux de surtension.*

déterminer pour le coefficient X une valeur moyenne de 230 A $F^{-1/2}$ soit une valeur trois fois plus élevée que celle correspondant au disjoncteur à autosoufflage de $SF_6$. L'application de la méthode de prédétermination des surtensions de coupure de courant inductif à un disjoncteur à air comprimé comportant six intervalles de coupure et pour les valeurs de réactances considérées précédemment, indique que les niveaux de surtension dépasseraient largement les niveaux admissibles. En conséquence, la limitation des surtensions par des résistances s'imposerait. On dispose d'ailleurs de résultats d'essais comparatifs effectués sur le réseau de Hydro-Québec montrant que la coupure de réactances par des disjoncteurs à air comprimé non munis de résistances d'ouverture est accompagnée de surtensions inacceptables.

Il est donc probant que cet important avantage du disjoncteur à autosoufflage de $SF_6$ considéré, sera apprécié puisqu'il permet d'utiliser pour la manœuvre des réactances, un appareil non muni de résistances sans aucun risque pour les isolations des réactances.

# 3 Cas du défaut alimenté à travers un transformateur

## 3.1 Contraintes

La sévérité que présentent, pour un disjoncteur, les conditions crées au moment de la coupure d'un court-circuit situé en aval d'un transformateur, ont déjà été décrites [3] [4]. Il a été mis en évidence que la coupure d'un tel court-circuit, quoique d'intensité largement inférieure à la pleine capacité de coupure d'un appareil, pouvait mettre en difficulté certains types de disjoncteurs. En particulier, une certaine sensibilité des disjoncteurs à faible volume d'huile est expliquée par le fait que pour les courants de défaut relativement faibles, la puissance de déionisation, fonction de l'intensité du courant coupé, était insuffisante compte tenu de la rapidité avec laquelle se rétablit la tension dans un circuit oscillant à fréquence très élevée. Il a également été remarqué des conditions d'installation de disjoncteurs à air comprimé dans lesquelles le disjoncteur n'était pas en mesure de couper un courant de court-circuit représentant 40 % de son pouvoir de coupure du fait de la valeur de la fréquence de la tension de rétablissement composée principalement de l'oscillation à 20 kHz d'un transformateur de 150 MVA (cf. **fig. 13**).

De tels cas se rencontrent de plus en plus fréquemment dans les installations alimentées à des tensions de 72 à 170 kV, et leur sévérité s'accroît, compte tenu de la puissance des transformateurs installés. La sévérité des conditions de coupure s'accroît, également lorsqu'il s'agit de transformateurs à faible tension de court-circuit, utilisés pour l'alimentation de certaines installations industrielles.

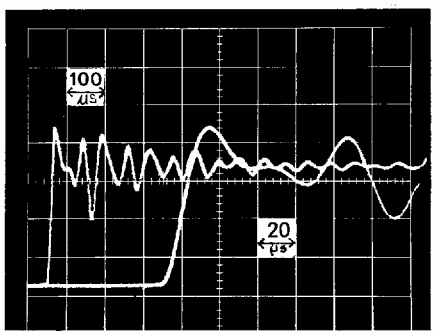


*Fig. 13 : oscillogramme de la TTR relevé lors de la coupure d'un défaut en aval d'un transformateur 220/60 kV.*
*P= 150 MVA ; Ucc = 10,3 %.*

Les conclusions tirées d'études menées sur de tels réseaux montrent que les TTR relevées dans le cas de défaut alimenté à travers le transformateur, sont largement plus sévères que celles spécifiées par les normes pour les courants de court-circuit correspondant à 10 et 30 % du pouvoir de coupure. Il était donc important de s'assurer que le disjoncteur à autosoufflage de $SF_6$ ne serait pas mis en difficulté dans des cas semblables.

## 3.2 Résultats d'essais

L'appareil essayé est un disjoncteur à autosoufflage de $SF_6$ comportant un seul intervalle de coupure (cf. **fig. 14**) utilisable sur les réseaux de tension allant de 72 à 170 kV. L'utilisation d'une réactance dans l'air, située en aval du disjoncteur (cf. **fig. 15**) a permis de réaliser les essais pour les valeurs de courant faible (1 et 2,5 kA). Les possibilités de réglage de la valeur du courant sur ce circuit étant limitées, on a utilisé par la suite un circuit d'essais synthétiques à injection de courant pour une gamme de courants coupés allant de 5 à 20 kA.

Le tableau de la **figure 16** résume les conditions d'essais et les résultats obtenus.

Les essais effectués présentent des conditions de sévérité qui se situent très largement au-delà de celles requises par les normes. Les résultats obtenus démontrent bien l'aptitude de ce disjoncteur à surmonter les contraintes les plus sévères qui peuvent apparaître dans le cas où

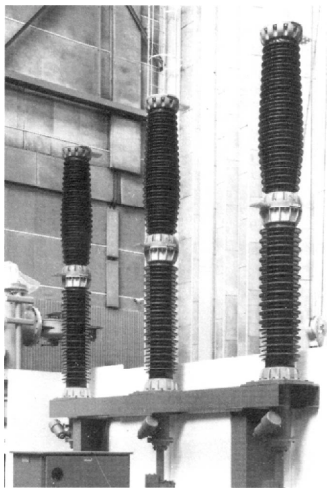

*Fig. 14 : disjoncteur à autosoufflage de $SF_6$ à 1 intervalle de coupure pour les tensions de 72 à 170 kV.*

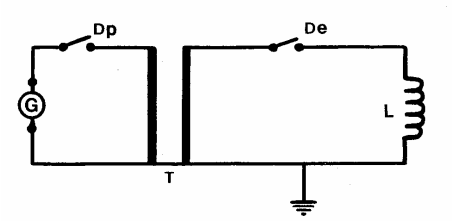


*Fig. 15 : circuit d'essais comportant une réactance élevée en aval du disjoncteur.*

des défauts sont alimentés par des transformateurs puissants, tels qu'on en rencontre dans certains types d'installations.

| Essais | Courant coupé I (kA) | Nombre d'essais | 1ère crête de tension $U_1$ ou $U_c$ (kV) | Fréquence F (kHz) | $T_1$ ou $T_3$ (µs) | VATR (kV/µs) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Essais avec self aval | 1,1 | 5 | 140 | 17 | 26 | 5,4 |
| | 2,5 | 6 | 85 | 28 | 15 | 5,7 |
| Essais synthétiques | 5 | 10 | 126 | 33 | 13,5 | 9,3 |
| | 10 | 3 | 126 | 22 | 20 | 6,3 |
| | 10 | 2 | 126 | 50 | 9 | 14 |
| | 15 | 3 | 139 | 22 | 20 | 7 |
| | 5 | 3 | 250 | 18 | 24,5 | 10,2 |
| | 10 | 5 | 250 | 18 | 24,5 | 10,2 |
| | 15 | 3 | 250 | 19 | 23 | 10,9 |
| | 20 | 2 | 250 | 21 | 21 | 11,9 |

*Fig. 16 : résultats d'essais de coupure à fréquence élevée.*

## 3.3 Conclusions

Il a été mis en évidence qu'il peut apparaître pour les disjoncteurs des réseaux ou des installations industrielles, des conditions de fonctionnement exceptionnelles s'écartant largement ou n'entrant pas encore dans le cadre des conditions normalisées.

Elles concernent tout spécialement :

- la coupure et l'enclenchement des courants de lignes à vide sous des tensions exceptionnellement élevées ;
- la coupure de courants de réactances shunt de lignes haute tension ;
- la coupure de courants de court-circuit alimentés à travers un transformateur.

Dans chaque cas, il a été possible de démontrer par des essais effectués en laboratoire, que les disjoncteurs à autosoufflage de $SF_6$ essayés, sont capables de faire face à des conditions particulièrement sévères pour lesquelles les disjoncteurs de technique plus ancienne pouvaient être mis en difficulté.

# Annexe :
# Les surtensions lors de la coupure des faibles courants inductifs

Les phénomènes susceptibles d'engendrer des surtensions à la coupure des faibles courants inductifs sont bien connus. Ils sont de deux types :

- l'interruption anticipée du courant, communément appelée « arrachement de courant »,
- les réallumages successifs.

Ces deux phénomènes peuvent d'ailleurs apparaître successivement à l'occasion d'une même manœuvre (cf. **fig. 17** ).

Dans les deux cas, le courant $i_d$ est interrompu alors que le courant $i_2$ n'est pas nul, par suite d'oscillations à haute fréquence qui se superposent à la composante du courant à fréquence industrielle, dans le disjoncteur.

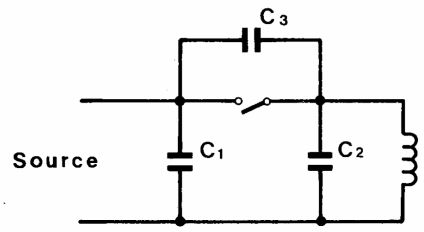


*Fig. 17 : schéma représentatif de la coupure d'un courant inductif.*

## Arrachement du courant

Le courant $i_d$ s'interrompt alors que le courant $i_2$ est égal à $i_o$ et que la tension $u_2$ a pour valeur $U_0$ (cf. **fig. 18** ).

Si on peut négliger l'amortissement du circuit aval pendant 1/4 de période de son oscillation propre, le calcul de la surtension est évident :

$$U_c = \sqrt{U_0^2 + \frac{L_2}{C'_2} I_0^2} \qquad (1)$$

où $C'_2$ est la capacité en parallèle sur la self $L_2$, après la coupure :

$$C'_2 = C_2 + \frac{C_1 C_3}{C_1 + C_3} \qquad (2)$$

Si $U_m$ est l'amplitude de la tension aval avant la coupure :

$$U_o \approx U_m \qquad (3)$$

le coefficient de surtension

$$k = \frac{U_c}{U_m}$$ s'écrit alors :

$$k = \sqrt{1 + \varepsilon^2} \qquad (4)$$

où

$$\varepsilon = \frac{I_0}{U_m} \sqrt{\frac{L_2}{C'_2}} \qquad (5)$$

Il est intéressant d'étudier le terme $\varepsilon$ lorsque la valeur du courant arraché vérifie la loi :

$$I_0 = \lambda \sqrt{n C'_3} \qquad (6)$$

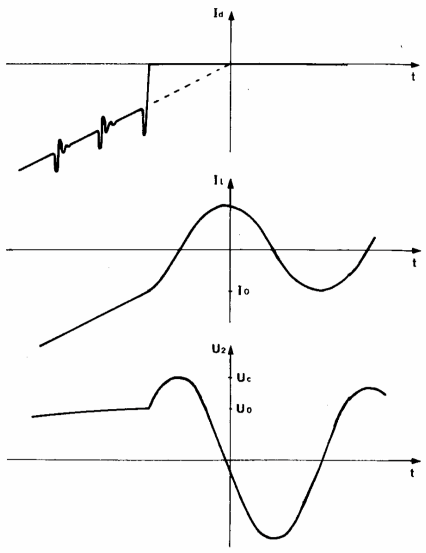


*Fig. 18 : coupure avec arrachement de courant :*
*$i_d$ : courant dans le disjoncteur*
*$i_2$ : courant dans le self aval*
*$u_2$ : tension aval*

où n est le nombre d'intervalles de coupure en série sur un pôle et $C'_3$ est la capacité en parallèle sur un pôle :

$$C'_3 = C_3 + \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (7)$$

La relation (4) devient :

$$\varepsilon = \frac{\lambda \sqrt{n L_2}}{U_m} \sqrt{\frac{C_1 + C_3}{C_1 + C_2}} \quad (8)$$

En règle générale, les valeurs des capacités sont telles que :
$C_1 \gg C_2$ and $C_1 \gg C_3$

La relation (8) devient donc :

$$\varepsilon = \frac{\lambda \sqrt{n L_2}}{U_m} \quad (9)$$

$$\text{d'où } k = \sqrt{1 + \frac{\lambda^2}{U_m^2} n L_2} \quad (10)$$

Il existe toutefois une limite supérieure de la valeur de $L_2$ au-delà de laquelle cette relation ne s'applique plus. Cette limite est atteinte lorsque le courant arraché est égal à l'amplitude du courant coupé.

En définitive, s'il se produit un arrachement de courant sans réallumage, le niveau de surtension peut être prédéterminé. De plus, si la capacité amont est grande par rapport aux autres capacités, le niveau de surtension ne dépend que du nombre d'intervalles de coupure par pôle et de la valeur de la self aval, pour un type de disjoncteur et une tension donnés.

## Réallumages successifs

Le phénomène des réallumages successifs illustré par la **figure 19** a été décrit dans la littérature [5]. Il faut essentiellement retenir que, dans ce cas, la surtension est due au transfert dans la capacité aval de l'énergie qui est réinjectée dans le circuit aval à l'occasion de chaque réallumage. Le maximum de tension n'est pas nécessairement atteint lors de la coupure définitive, mais il peut se produire plus tôt, en fonction des échanges d'énergie entre le circuit amont et le circuit aval. Le niveau de surtension dépend de nombreux paramètres tels que :

- la fréquence propre du circuit aval ;
- l'instant d'ouverture des contacts par rapport à la phase du courant ;
- la vitesse de rétablissement de la rigidité diélectrique entre contacts ;
- les caractéristiques de l'oscillation de courant à haute fréquence qui dépendent elles-même de la distance séparant les capacités amont et aval.

La nature de certains de ces paramètres confère à ce phénomène un caractère très aléatoire et il paraît très difficile de prédéterminer le niveau de surtension qui pourra être atteint sur un réseau donné. Ceci est encore aggravé par l'interaction qui peut se produire entre les phases.

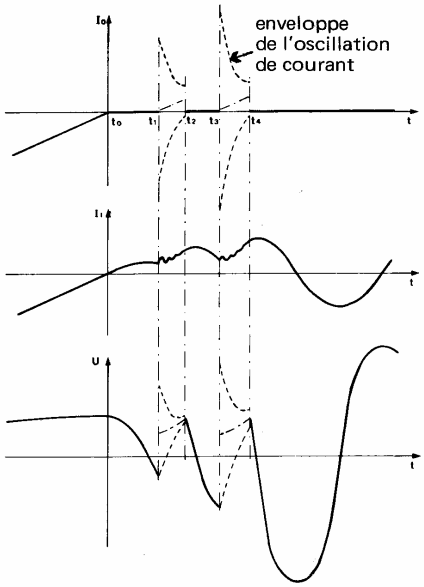


*Fig. 19 : coupure suivie de plusieurs réallumages successifs.*

# Bibliographie

**[1]** Vers le disjoncteur sans entretien
CIGRE 1974 – Rapport 13-06.
R. Michaca, J. Verdon, J.C. Okerman, C. Rollier, J. Daillet, B. Trolliet.

**[2]** Coupure de réactances shunt - Comparaison entre essais in situ et essais en laboratoire
CIGRE 1976 - Rapport 13-04.
S. Berneryd, C.E. Solver, L. Ahlgren, R. Erikson.

**[3]** Tension transitoire de rétablissement relative à la coupure de courants de court-circuit limités par des transformateurs
CIGRE 1970 - Rapport 13-07.
Comité d'études n° 13.

**[4]** Transient recovery voltages associated with power system, three-phase transformer secondary faults
IEEE PAS 91 - September/October 1972 pages 1887 à 1896.
R. Harner and J. Rodriguez.

**[5]** Comparaison des surtensions de contacteurs HT à coupures sous vide et dans l'air
Cahier Technique n° 66.
J.L. Mircovich, G. Perrissin.

**Schneider Electric**

Direction Scientifique et Technique,
Service Communication Technique
F-38050 Grenoble cedex 9
Télécopie : 33 (0)4 76 57 98 60

Réalisation : HeadLines - Meylan
Edition : Schneider Electric
- 20 € -

© 2002 Schneider Electric

12-02